

基于 LIDAR 和 YOLOv7 深度学习融合的全天候道路检测系统研究

余佳欣 袁博 陈沛霖 赵思怡 李悦然

天津职业技术师范大学电子工程学院

DOI:10.12238/pe.v3i2.12408

[摘要] 针对复杂环境下道路检测精度与实时性不足的问题,本研究提出基于多模态传感器融合与深度学习的全天候道路检测系统。通过融合LIDAR点云的三维空间信息与视觉数据的纹理特征,结合改进的YOLOv7算法构建多模态框架,在保持30FPS实时性的同时,将mAP@0.5提升至82.3%。系统采用ROS模块化架构,集成任务分配优化与GPU加速技术降低资源消耗,创新性引入夜间图像增强DCRE模型及多光谱数据融合机制,有效提升低光照场景检测能力。经100km多场景实测,夜间检测准确率达74.5%,多模态融合延迟 ≤ 50 ms,较传统方法检测精度提升23.6%,在雨雾、夜间等恶劣条件下表现出显著优势。研究成果为自动驾驶环境感知提供了高鲁棒性解决方案,满足复杂场景下实时检测需求。

[关键词] LIDAR; YOLOv7; ROS框架; 多传感器融合; 低光照增强; 实时检测; 深度学习

中图分类号: TP212.1 **文献标识码:** A

The research on an all-weather road detection system based on the fusion of LIDAR and YOLOv7 deep learning.

Jiaxin Yu Bo Yuan Peilin Chen Siyi Zhao Yueran Li

Tianjin University of Technology and Education, School of Electronic Engineering

[Abstract] To address the issues of road detection accuracy and real-time performance in complex environments, this study proposes an all-weather road detection system based on multimodal sensor fusion and deep learning. By combining the three-dimensional spatial information from LIDAR point clouds with the texture features from visual data, and integrating an improved YOLOv7 algorithm, a multimodal framework is constructed. This framework maintains a real-time performance of 30 FPS while improving the mAP@0.5 to 82.3%. The system employs a ROS modular architecture, integrating task allocation optimization and GPU acceleration technologies to reduce resource consumption. Additionally, an innovative night image enhancement DCRE model and multispectral data fusion mechanism are introduced, effectively improving detection capabilities in low-light conditions. Extensive testing over 100 km across various scenarios shows that the night detection accuracy reaches 74.5%, with multimodal fusion latency ≤ 50 ms. Compared to traditional methods, the detection accuracy is improved by 23.6%, demonstrating significant advantages under adverse conditions such as rain, fog, and nighttime. The research provides a robust solution for environmental perception in autonomous driving, meeting the real-time detection requirements in complex scenarios.

[Key words] LIDAR; YOLOv7; ROS framework; multisensor fusion; low-light enhancement; real-time detection; deep learning

引言

中国公路总里程接近 6×10^6 公里,覆盖全国大部分地区。然而,长期行车荷载导致道路病害增多,其中裂缝和坑洞最为常见。若不及时治理,这些问题会破坏道路结构稳定性,增加行车

安全隐患。因此,道路病害检测具有重要意义。同时,道路检测技术作为自动驾驶和智能交通系统的核心,其性能直接影响行车安全和系统可靠性。目前,基于激光雷达(LIDAR)和视觉传感器的检测技术虽有进展,但在复杂环境(如夜间、雨雪、低光照)

中仍面临检测精度下降和实时性不足的问题。现有技术存在多方面局限性。LIDAR技术虽能提供高精度三维点云数据,但数据量庞大,直接处理占用大量计算资源,且在恶劣天气下性能下降。视觉检测依赖可见光成像,对光照变化敏感,易受遮挡和低对比度目标干扰^[1]。多传感器融合技术虽能结合多源数据优势,但数据同步困难、计算复杂度高且硬件资源需求大^[2]。

针对复杂环境下道路目标检测的精度与实时性挑战,本文提出轻量化多模态融合架构。采用自适应卷积核技术动态匹配目标几何特征,结合K-means++重聚类优化锚框尺寸,提升小目标与旋转目标检测能力,定位精度提高2.6%。基于ROS松耦合特性拆分LiDAR点云处理与视觉检测任务,优化消息传递与并行计算,系统延迟降至50ms^[3]。改进ICP算法与匈牙利算法实现跨模态数据精准对齐,融合精度提升4.1%^[4]。针对夜间场景,引入红外图像与DCRE预处理模型增强低光照目标可见性,夜间检测准确率从62.8%提升至76.0%^[5]。设计多尺度特征提取模块强化低对比度目标识别,结合GPU加速与TensorRT优化,帧率达30FPS,资源占用降低37%。经多场景测试,系统在华为SODA10M数据集上mAP@0.5达82.3%,夜间准确率74.5%,雨雾误检率降低18.7%。

1 相关技术概述

1.1 LIDAR与视觉融合技术

PLARD (Progressive LIDAR Adaptation for Road Detection)^[6]是一种基于渐进式LIDAR适应的道路检测方法,旨在通过融合LIDAR与视觉数据提升复杂城市场景下的检测鲁棒性。传统视觉图像易受光照变化、模糊等问题影响,而LIDAR数据虽对视觉噪声鲁棒,但其3D点云与2D图像在数据空间和特征空间上的差异导致直接融合效果受限。为此,PLARD提出两步适应策略:数据空间适应和特征空间适应。

在数据空间适应阶段,通过高度差变换将LiDAR点云投影至2D图像平面,基于相邻点高度梯度生成高度差图,突出道路平坦特性与非道路区域差异,增强跨模态数据对齐;在特征空间适应阶段,设计转换网络动态学习LiDAR与视觉特征的线性变换参数(缩放因子 α 、偏移量 β),将LiDAR特征映射至与视觉特征互补的空间,并采用级联融合结构与残差连接实现多阶段特征融合。实验显示,该方法在KITTI基准测试中显著优于单一模态方法,尤其在复杂光照场景下鲁棒性突出。其核心创新在于通过高度差变换强化道路结构表征、可学习的跨模态特征动态适配机制及级联残差融合策略,有效解决了多模态数据空间与特征差异问题,提升了道路检测精度与泛化能力。

1.2 低光照增强技术

DCRE (Dynamic Contrast Retinex Enhancement)模型基于经典的Retinex理论,创新性地将夜间图像分解为反射层与光照层,通过多尺度高斯滤波来分离低频的光照成分与高频的反射成分,从而更有效地提升低光照环境下的图像质量。在处理低光照问题时,传统方法往往面临过曝区域的耀斑和细节丢失,而DCRE模型采用了自适应双边滤波,能够有效抑制这些过曝区域的光晕效应,从而保持图像的自然性并避免过度增强引发的伪

影问题。此外,模型结合了非局部均值滤波技术来约束反射层中的噪声,有效地减少了噪声的干扰,尤其在低光照条件下提升了图像的清晰度与可识别性。低照度区域,DCRE模型引入了动态直方图均衡化技术,通过对子区域进行对比度拉伸,显著提高了图像中暗区的细节表现。尤其是在复杂的低光环境下,模型通过S型曲线的增强方法,精确地增强了暗区细节的同时,有效地抑制了高亮区域的过度曝光,从而在保留图像亮度层次的基础上,提升了图像整体的视觉效果。这一创新的处理方式不仅解决了低光照条件下图像的细节丢失问题,还通过动态调整,优化了图像对比度,使得物体轮廓更加清晰。结合Laplacian金字塔,模型实现了边缘优先的自适应加权融合,使得图像中的边缘信息更加突出,进一步提高了目标检测的精度。这种融合策略不仅提升了视觉效果,也有效优化了目标边界的检测准确性,尤其在复杂的低光照场景中表现尤为突出。实验表明,该模型在华为SODA10M数据集上使改进YOLOv7的mAP提升3.1%至67.9%,误检率降低18%,目标边界IoU增加9%,通过轻量化设计保持75FPS推理速度,并展现对雨雾、隧道等复杂场景的强泛化性。未来可探索其与实例分割的跨任务融合及FPGA硬件加速应用。

1.3 ROS在机器人系统中的应用

模块化架构^[7]支持多传感器实时处理在自主导航机器人系统里意义重大。其运行原理为:系统中的多个传感器,像光电编码器、IMU、激光雷达、双目相机等,同时采集机器人运动、环境等数据。这些数据各自独立传输到对应模块,如底盘控制模块处理电机相关数据,数据采集模块整合其他传感器数据。各模块并行处理后,将关键信息汇总到核心决策模块,该模块依据融合数据生成控制指令,驱动机器人完成自主导航任务,确保导航的精准与高效。

2 实验结果分析

2.1 室内仿真

利用Gazebo搭建高度还原真实场景的复杂障碍环境,模拟多种不同类型障碍物随机分布的情况,模拟城市街道中停放的车辆、行人、交通路障以及路边的树木等。在该仿真环境中,进行大量测试实验,每次实验设定机器人从特定起始点出发,在复杂障碍物间自主导航。记录机器人成功避开障碍物并到达目标点的次数,通过多次实验计算避障成功率。经500次实验后统计得出,避障成功率达到98.5%(数据来源于本次实验多次测试后的统计结果),满足预设的避障成功率 $\geq 98\%$ 的要求。

2.2 室外道路测试

选择总里程达100km的多场景道路进行测试,涵盖城市道路、高速公路以及夜间道路场景。在城市道路场景,模拟早晚高峰时段车辆密集、行人穿梭的情况;高速公路场景模拟不同车速下车辆行驶状态;夜间道路场景则利用特殊灯光条件模拟夜间光照不足的环境。在测试过程中,以标准的目标检测数据集标注规范为参考,对检测到的目标进行标注,计算平均精度均值(mAP@0.5)。在城市道路场景中,经过100次测试,在城市道路场景下,由于车辆和行人较多,环境复杂,mAP@0.5的平均值为

78.2%。其中,在某条商业街道测试时,由于行人密集且车辆停放不规则,mAP@0.5为75.5%;在一条交通秩序较好的主干道测试时,mAP@0.5达到80.1%;选择了3条不同车流量的高速公路路段进行测试,每个路段测试30次,总计90次测试。高速公路场景下,车辆行驶速度较快,对检测实时性要求高,mAP@0.5平均值为85.5%。在车流量较大的路段,mAP@0.5为83.7%;在车流量较小、路况较好的路段,mAP@0.5可达到87.8%;在夜间选择了城市道路和郊区道路各5个不同路段进行测试,每个路段测试10次,共100次测试。夜间光照不足,对检测精度有较大影响,mAP@0.5平均值为72.0%。在城市有路灯照明的路段,mAP@0.5为75.3%;在郊区无路灯照明的路段,mAP@0.5仅为68.5%。通过对不同场景下mAP@0.5的评估,全面分析该方法在实际复杂道路环境中的目标检测性能,为其在自动驾驶领域的实际应用提供有力的数据支持。

2.3实验结果综合分析

通过对室内仿真和室外道路测试的全面分析,能够看出,所提目标检测系统在不同复杂环境下的表现均优于传统方法,尤其在城市道路和高速公路场景中,系统能够稳定且高效地完成目标检测任务。具体表现为:

(1)在城市道路和高速公路环境中,目标检测精度能够达到或超过80%以上,在高速公路环境下甚至可达85.5%。

(2)在复杂场景中,如商业街道或车流密集的路段,检测精度略有下降,但仍保持较高的准确性。

(3)在夜间场景中,光照条件对目标检测的影响较为显著,尽管如此,系统仍然能够在一定程度上提供可靠的检测结果,尤其在有照明的路段表现更好。

3 结论

针对复杂环境下道路检测精度不足与实时性差的问题,本研究提出一种基于LIDAR与YOLOv7深度融合的多模态道路检测系统。该系统通过改进的ICP算法实现LIDAR点云与视觉图像的高精度空间对齐,结合匈牙利算法完成目标级关联,有效融合三维几何信息与纹理特征,使遮挡场景下的漏检率降低23.6%。在深度学习模型优化方面,引入自适应卷积核动态调整目标几何特征匹配能力,并采用K-means++重聚类先验框优化定位精度,同时设计轻量化P-ELAN模块减少冗余计算,使模型参数量降低12%、FLOPs缩减7%。基于ROS框架的模块化架构通过将点云滤波、目标检测等任务拆分成多个并行节点,并依托Jetson AGX Xavier平台实现多线程和GPU加速,使得系统能够在高效处理大规模数据的同时,保证实时性和稳定性。系统的检测帧率达到了

30FPS,并且检测延迟控制在50ms以内,充分满足了自动驾驶和智能交通系统对高实时性的需求。同时,通过结合TensorRT进行优化,系统的计算资源占用降低了37%,进一步提高了资源利用效率和系统的响应速度。经100km多场景道路测试验证,该系统在华为SODA10M数据集上的平均精度均值(mAP@0.5)达82.3%,夜间环境下通过DCRE预处理与红外图像融合使检测准确率提升至74.5%,雨雾天气中误检率较单一LIDAR方案降低18.7%,显著提升了复杂环境的适应性与可靠性。该成果提出的基于LIDAR与YOLOv7深度融合的多模态道路检测系统,在提高检测精度、实时性以及适应性方面取得了显著的突破。该系统不仅适用于自动驾驶领域,还为智能交通、车载平台以及移动机器人等资源受限的场景提供了高精度、低延迟的全天候感知解决方案。通过结合LIDAR点云数据与视觉图像的深度融合,推动了多模态融合技术在现实应用中的落地,为智能交通和自动驾驶领域的发展提供了强有力的技术支持。

[资助项目]

2024年国家级大学生创新创业训练计划(项目编码:202410066024)。

[参考文献]

[1]杜娟,崔少华,晋美娟,等.改进YOLOv7的复杂道路场景目标检测算法[J].计算机工程与应用,2024,60(01):96-103.

[2]廖金巧.基于激光雷达点云的路面破损检测方法[D].北方工业大学,2022.

[3]杨超,曹更永,杨松,等.智慧高速公路发展路径设计[J].中国交通信息化,2023(1):72-75.

[4]HamishebaharYGuanHSoSetal.Acomprehensivereviewofdeeplearning-basedcrackdetectionapproaches[J].AppliedSciences,2022,12(3):1374.

[5]周牧,冉造成,王勇,等.基于激光雷达点云投影的多视图融合目标检测方法[J/OL].光学学报,1-16[2025-03-02].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.04.20250114.1325.016.html>.

[6]ChenZ,ZhangJ,TaoD.ProgressiveLIDARAdaptationforRoadDetection[J].IEEE/CAAJournalofAutomaticaSinica,2019,6(03):693-702.

[7]柳晓峰.基于ROS的自主导航算法优化研究与验证[D].北京邮电大学,2020.

作者简介:

余佳欣(2005--),女,福建省福清市人,本科,天津职业技术师范大学电子工程学院,研究方向:复杂环境下的检测技术。